

打印店内 PM_{2.5} 和 PM₁ 的特征与影响因素分析

高琰钧¹ 魏玉虾¹ 陈俏¹ 高萌¹ 罗冬梅¹ 陈瑶¹ 王云¹ 赵茜¹ 余灿清²
何丽华¹ 徐钰³

¹北京大学公共卫生学院劳动卫生与环境卫生学系 100191;²北京大学公共卫生学院流行病学与卫生统计学系 100191;³北京大学人民医院呼吸科 100191

通信作者:王云, Email: wangyun@bjmu.edu.cn, 电话:010-82801523

【摘要】 目的 分析打印店内 PM_{2.5} 和 PM₁ 的释放情况和特征,探讨打印机工作过程中颗粒物释放峰值的影响因素。方法 于 2018 年 1 月 5 日在北京某打印店进行连续 12 h PM_{2.5} 和 PM₁ 的动态浓度监测,并采集 PM_{2.5} 进行形态和元素构成分析;同时在密闭工作场所开展实验,分别探究不同打印机品牌、页面覆盖率及静息时间下打印机释放 PM₁ 的数量浓度峰值的差异。结果 动态浓度监测显示,打印店工作时 PM₁ 的数量浓度和 PM_{2.5} 的质量浓度峰值为 7.510×10⁴ 个/cm³ 和 96.85 μg/m³;形态和成分分析显示,打印店室内 PM_{2.5} 有球状(88.6%)、杆状(3.4%)和不规则状(8.0%),其粒径主要集中于 100 nm 以下,并存在典型的团聚现象,分形维数 D 为 2.591,PM_{2.5} 的主要构成元素为 C、O、Si、Ca。3 台不同品牌打印机打印工作中 PM₁ 释放峰值分别为 3.60×10⁴、3.43×10⁴ 和 0.31×10⁴ 个/cm³,差异没有统计学意义(χ²=5.42, P>0.05)。当页面覆盖率依次为 0%、2.5%、5%、10%、20% 和 50% 时,A 打印机工作中的 PM₁ 释放峰值依次为 6.74×10⁴、4.62×10⁴、3.82×10⁴、2.82×10⁴、1.00×10⁴ 和 1.08×10⁴ 个/cm³,差异没有统计学意义(χ²=7.01, P>0.05)。打印工作中 PM₁ 的释放峰值的自然对数值与打印前的静息时间及打印机部件加热辊的温度变化值均有关(r 值分别为 0.83 和 0.89, P 值均<0.05)。结论 打印店室内空气 PM_{2.5} 和 PM₁ 含量较高,形态和元素构成较为多样;加热辊的温度变化是导致 PM₁ 数量浓度峰值上升的重要因素之一。

【关键词】 颗粒物; 元素; 打印机; 形态结构; 分形理论

基金项目:北京市自然科学基金(7172116);国家自然科学基金青年基金(31400863)

DOI:10.3760/cma.j.issn.0253-9624.2019.03.009

Analysis of characteristics and influencing factors of fine particulate matters and submicron particulate matters in printing shop

Gao Yanjun¹, Wei Yuxia¹, Chen Qiao¹, Gao Meng¹, Luo Dongmei¹, Chen Yao¹, Wang Yun¹, Zhao Qian¹, Yu Canqing², He Lihua¹, Xu Yu³

¹Department of Occupational and Environmental Health, School of Public Health, Peking University, Beijing 100191, China; ²Department of Epidemiology and Biostatistics, School of Public Health, Peking University, Beijing 100191, China; ³Department of Respiratory Medicine, Peking University Renming Hospital, Beijing 100191, China

Corresponding author: Wang Yun, Email:wangyun@bjmu.edu.cn, Tel: 0086-10-82801523

【Abstract】 Objective To analyze the physical characteristics of fine particulate matters (PM_{2.5}) and submicron particulate matters (PM₁), and investigate the factors influencing the emission peak of printer particles. **Methods** A 12-hour particle concentration monitoring for PM_{2.5} and PM₁ was conducted in a printing shop on January 5th, 2018. PM_{2.5} in the air was analyzed after the monitoring process to figure out morphological characteristics and element composition of printer particles. Besides, experiments were carried out in an enclosed space to detect the number concentration peaks of PM₁ during every printing process. Influencing factors investigated in this study were printer types, toner coverages and interval time between different printing processes. **Results** The 12-hour particles concentration monitoring showed that the number concentration of PM₁ and the mass concentration of PM_{2.5} were 7.510×10⁴ pt/cm³ and 96.85 μg/m³. The

diameter of most $PM_{2.5}$ was less than 100 nm, with a fractal dimension of 2.591. Most $PM_{2.5}$ appeared as regular spheres with typical agglomeration phenomenon, while some were in rhabditiform or irregular shapes. Element analysis showed that $PM_{2.5}$ was mainly composed of C, O, Si, Ca, with less metallic element. The PM_{10} emission peak values of three printers were 3.60×10^4 , 3.43×10^4 , 0.31×10^4 pt/cm³, respectively and the difference was not statistically significant ($\chi^2=5.42, P>0.05$). When the page coverage rate was 0%, 2.5%, 5%, 10%, 20% and 50%, the PM_{10} emission peak value of printer A was 6.74×10^4 , 4.62×10^4 , 3.82×10^4 , 2.82×10^4 , 1.00×10^4 and 1.08×10^4 pt/cm³, and the difference was also not statistically significant ($\chi^2=7.01, P>0.05$). The natural logarithm of PM_{10} emission peak value in printing work was associated with the resting time before printing and the change value of heating roller temperature (r value was 0.83 and 0.89, respectively, all P values <0.05). **Conclusion** $PM_{2.5}$ and PM_{10} in the printing shop stayed at a high level. Particles appeared as various shapes and element compositions were complex. The temperature change of heating roller was one of most important factors that lead to the increased number concentration peak of PM_{10} .

【Key words】 Printer; Particles; Morphological characteristics; Element composition; Fractal theory

Fund program: The Beijing Natural Science Foundation (7172116); National Natural Science Foundation of China (31400863)

DOI:10.3760/cma.j.issn.0253-9624.2019.03.009

近年来室内空气质量(indoor air quality, IAQ)日益受到人们关注,有研究发现颗粒物污染与多种呼吸系统和循环系统疾病有关,并且对于孕妇的颗粒物暴露还可增加新生儿低出生体重的发生风险^[1-2]。打印机作为室内常用办公设备,在工作过程中会释放大量 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} , 进而影响 IAQ 并危害人体健康^[3]。Karimi 等^[4]的研究表明,与一般人群相比,从事打印工作的人群在以 1 秒用力呼气容积(forced expiratory volume in the first second, FEV₁)和用力肺活量(forced vital capacity, FVC)表示的肺功能及以哮喘和咳嗽为代表的呼吸症状发生率方面都存在明显差别;潘祥凯等^[5]也指出随着打印机职业暴露时间的延长,尘肺、血栓、碳纳米颗粒物腹膜沉积等严重疾病的发生率也会增加。然而,目前有关打印机工作场所相关暴露的研究较少,打印机释放的 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 物理化学性质以及影响颗粒物释放的因素尚未完全明确。本研究通过探讨页面覆盖率和静息时间等对 PM_{10} 释放峰值的影响,同时动态监测打印店 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度水平,并对 $PM_{2.5}$ 形态、粒径和元素组分进行分析,揭示打印店内 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 暴露水平及其理化特性和影响因素,以促进健康防护措施的完善并为相关职业规范的制定提供参考。

材料与方 法

一、打印店内 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 监测和特征分析

1. 打印店内 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 监测:于 2018 年 1 月 5 日选取北京某学校内打印店(3.5 m×5.5 m×2.6 m,

门:1 m×2.1 m,窗户:1.85 m×1.1 m)开展监测工作。在店员经常活动的工作点呼吸带高度设置监测采样点,采用美国 TSI 公司 P-TRAK 8525 超细粒子计数器连续监测店内 PM_{10} 数量浓度;美国 THERMO FISHER 公司 PDR-1500 气溶胶颗粒物检测仪连续监测店内 $PM_{2.5}$ 质量浓度。监测工作从打印店营业前 10 min 开始直至营业结束,共监测 12 h。同时实时记录打印店内工作情况、气温和相对湿度变化,并将该日北京市海淀区万柳监测站公布的 $PM_{2.5}$ 质量浓度作为室外 $PM_{2.5}$ 浓度参考值。

2. $PM_{2.5}$ 特征分析:使用美国 PALL 公司生产的 7202 石英膜采集 $PM_{2.5}$, 扫描电子显微镜(型号 SU8010, 日本日立公司)下观察颗粒粒径与形貌,结合 X 射线光电能谱仪表征颗粒成分。采用 Mandelbrot^[6]于 1967 年提出的分形理论与贾荷花和李传统^[7]的推论计算分形维数 D 以反映 $PM_{2.5}$ 的表面参数和扩散能力。

二、打印机工作过程中 PM_{10} 释放数量浓度峰值的影响因素研究

1. 测定条件设置:将打印机置于体积为 36.5 m³ (4.5 m×2.8 m×2.9 m)的办公室内,打印工作开始前室内外 PM_{10} 数量浓度均 $<5 \times 10^3$ 个/cm³。实验时关闭门窗,室内温度为 17.2~22.0 ℃,相对湿度为 22%~25%。使用 70 g/m² 的标准 A4 打印纸,黑白单面打印,打印机进纸速度为每分钟 20 页。在距打印机出纸口 17 cm 处采用美国 TSI 公司 P-TRAK 8525 超细粒子计数器连续监测打印机所释放的 PM_{10} 数量浓度,测量从打印工作开始前 2 min 开始,到打印工作结束 10 min 后停止,所分析的影响因素包括打印

机品牌、页面覆盖率和打印工作之间的静息时间。

2. 不同品牌打印机工作时 PM_{10} 的释放情况: 选择 3 种不同品牌、型号的市售打印机: A 型为黑白激光打印复印扫描一体机、B 型为黑白激光打印复印一体机、C 型为黑白激光打印机, 均使用国产兼容硒鼓。打印内容为小写字母 a (每页 33 行, 每行 64 字, 字号为小四, 字体为 Times New Roman, 单面), 单次试验每台打印机打印 20 页, 实验重复 3 次。

3. 不同打印覆盖率下 PM_{10} 的释放情况: 选择打印机 A, 打印内容设置为占纸张总面积 0%、2.5%、5%、10%、20%、50% 的黑色方块, 单次实验每种页面覆盖率打印 20 页, 实验重复 3 次。

4. 不同静息时间下 PM_{10} 的释放情况: 选择打印机 A, 打印内容为小写字母 a (每页 33 行, 每行 64 字, 字号为小四, 字体为 Times New Roman, 单面), 每次先打印 20 页, 将静息时间分别设定为 5、10、15、20、30、60 min, 静息时间结束后重复进行打印工作, 在后一次打印工作进行时测定 PM_{10} 释放水平, 同时使用香港希玛科技有限公司生产的 AS842A 型非接触式红外线测温仪分别测定硒鼓、纸张和加热辊在后一次打印工作前后的温度变化。

三、统计学分析

采用 Excel 2010 进行数据录入, 采用 SPSS 20.0 进行统计分析。 $PM_{2.5}$ 粒径为偏态分布, 采用中位数、最小值、最大值进行描述。关于打印工作过程中释放 PM_{10} 的影响因素研究, 将打印机的工作过程划分为工作前 (0~2 min)、工作过程中 (3~4 min) 以及停止工作后 (5~12 min), 以工作前 (0~2 min) 所测定的室内 PM_{10} 数量浓度平均值作为本底值, 使用 3 个工作阶段中所测得的室内 PM_{10} 数量浓度峰值减去该本底值作为该阶段打印机实际释放 PM_{10} 的数量浓度峰值。采用 Kruskal-Wallis 秩和检验比较不同品牌打印机或页面覆盖率时打印机工作过程中

所释放 PM_{10} 数量浓度峰值的差异。采用 Pearson 相关、线性回归模型分析静息时间与 PM_{10} 数量浓度峰值的关系; 采用 Pearson 相关分析硒鼓、纸张和加热辊温度变化与静息时间、 PM_{10} 数量浓度峰值之间的关系, 并结合线性回归模型评价其效应, 其中 PM_{10} 数量浓度峰值经自然对数转换后纳入模型。 $P < 0.05$ 为差异具有统计学意义。

结 果

一、打印店 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 释放情况与特征分析

1. $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 动态浓度值变化: 监测工作开展当天北京室外 $PM_{2.5}$ 平均质量浓度值为 $23.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 全天浓度变化较为稳定 ($22.0\sim 38.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$)。打印店内 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 释放水平存在波动, $PM_{2.5}$ 质量浓度和 PM_{10} 数量浓度峰值分别为 7.510×10^4 个/ cm^3 和 $96.85 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 平均浓度值则分别为 1.854×10^4 个/ cm^3 和 $27.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$; 进一步分析颗粒物释放情况和打印工作之间的关系, 在打印工作初始时会出现 PM_{10} 释放高峰, 之后随着每次打印工作量的增加, 均出现 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 释放峰, 且打印页数较多的情况下峰值一般较高。在下午 17:00 左右, 由于员工修理维护打印机导致墨粉溢出, 使得室内 $PM_{2.5}$ 质量浓度在开窗换气情况下仍持续升高。详见图 1。

2. $PM_{2.5}$ 形态成分分析: 打印店内采集的 $PM_{2.5}$ 中 88.6% 为规则球形, 3.4% 为杆状, 另有 8.0% 为不规则形。进一步对 $PM_{2.5}$ 进行粒径分析, 其粒径分布类型为典型的偏态分布, 在所计数的 586 个颗粒物中, 粒径中位数为 85.08 nm, 最小值为 26.43 nm, 最大值为 414.38 nm, 其中 61.8% 的空气动力学粒径 $\leq 0.1 \mu\text{m}$, 并且存在明显的团聚现象。详见图 2。经计算, $PM_{2.5}$ 的体积分形维数 D 为 2.591。对 $PM_{2.5}$ 团聚体进行能谱分析, 结果显示其主要构成元素为 C

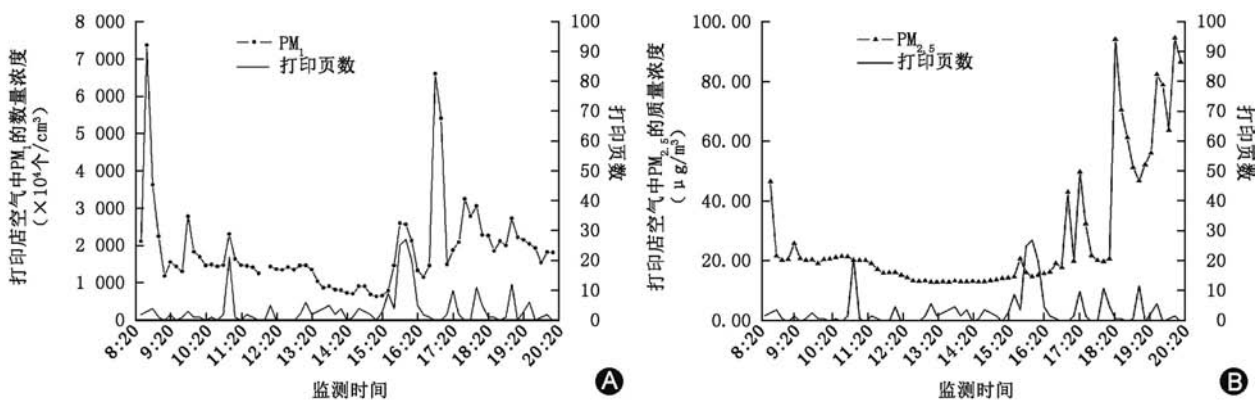


图 1 北京某打印店室内 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 和打印页数的监测情况 ($n=700$) 图 A 为 $PM_{2.5}$ 的质量浓度监测; 图 B 为 PM_{10} 的数量浓度监测

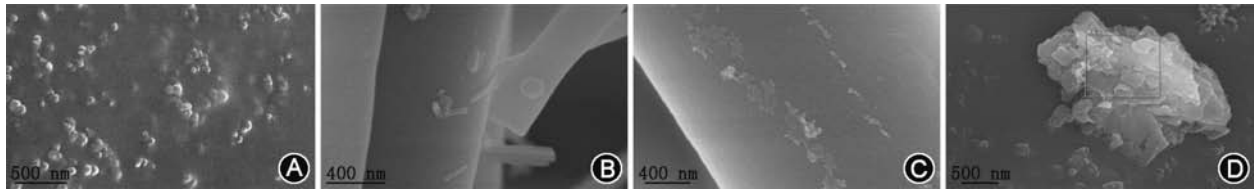
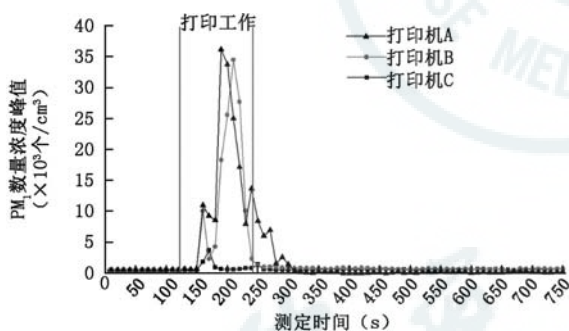


图2 打印店室内PM_{2.5}的电镜形态特征分析 图A为球形颗粒物;图B为杆状颗粒物;图C为不规则颗粒物;图D为颗粒物团聚体

和O(分别为54.1%和35.5%),Si和Ca的含量也较高(分别为3.8%和3.2%),而Fe、Al、Zn、Mg等其他金属元素的含量则相对较低。

二、打印机PM₁释放峰值的影响因素分析

1. 不同品牌打印机PM₁的释放情况:3种打印机PM₁的释放模式都呈现出“首峰效应”,即在打印工作开始之后PM₁大量释放达到高峰,打印工作结束后快速度衰减,但是在较长时间后才恢复到本底值。A、B、C 3台打印机工作前、工作时与工作后的室内PM₁数量浓度峰值相差较大,说明打印工作可以对室内环境中PM₁数量浓度峰值造成较大影响,但打印工作结束后PM₁最终通过扩散作用发生了数量浓度的稀释,使得工作前后PM₁数量浓度峰值变化较小。详见图3。3台打印机释放峰值分别为 3.60×10^4 、 3.43×10^4 和 0.31×10^4 个/cm³,差异没有统计学意义($\chi^2=5.42, P>0.05$)。



打印工作开始时间为120 s,结束时间为240 s

图3 不同打印机作业过程中释放的PM₁数量浓度($n=750$)

2. 不同打印覆盖率下PM₁的释放情况:当页面覆盖率依次为0%、2.5%、5%、10%、20%和50%时,A打印机工作中的PM₁释放峰值依次为 6.74×10^4 、 4.62×10^4 、 3.82×10^4 、 2.82×10^4 、 1.00×10^4 和 1.08×10^4 个/cm³,差异没有统计学意义($\chi^2=7.01, P>0.05$)。

3. 不同静息时间下PM₁的释放情况:随着连续打印之间静息时间的延长,下次打印工作时PM₁的释放峰值上升($r=0.83, P=0.039$),使用线性回归模型进行分析,PM₁数量浓度的自然对数值与间隔时间的线性回归拟合度较好, β (95%CI)值为0.051(0.004~0.098)。进一步测定打印过程中纸张、硒鼓

和加热辊的温度变化情况,随着静息时间的延长,加热辊在打印前后温度变化范围为22.9~46.1℃,呈现上升趋势($r=0.956, P=0.003$),硒鼓在打印前后温度几乎不变,而纸张由于受到加热辊、加压胶辊和传动轴等诸部件的作用,温度变化范围为45.2~58.9℃,并未呈现明显规律($r=0.41, P=0.42$)。不同静息时间加热辊温度变化值和PM₁峰浓度自然对数值的相关性分析结果显示二者之间呈正相关($r=0.89, P=0.017$),回归分析后以线性模型拟合最佳($F=15.35, R^2=0.79, P=0.017$)。

讨 论

本研究发现打印工作可对室内空气质量造成影响。打印店12 h动态监测结果显示,PM_{2.5}质量浓度平均值($27.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$)虽低于《建筑通风效果测试与评价标准》(JGJ/T 309-2013)所规定室内空气可吸入PM_{2.5}推荐值($75 \mu\text{g}/\text{m}^3$),但峰值 $96.85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 达到了该标准的1.27倍^[8]。我国目前未设立PM₁数量浓度的职业接触限值,参考澳大利亚昆士兰科技大学国际空气质量与健康研究院推荐的办公场所PM₁接触阈值(2×10^4 个/cm³),PM₁数量浓度峰值 7.51×10^4 个/cm³达到了该值的3.75倍^[5]。因此,有必要关注打印场所室内细颗粒物污染问题。

形态特征分析发现打印店内PM_{2.5}粒径中位数为85.08 nm,多数为超细颗粒物,且存在明显团聚现象。Pirela等^[9]在真空室中使用静电沉积获得打印机颗粒物的粒径集中于50 nm,而潘祥凯等^[5]在开放空间中以相同方法进行实验发现粒径集中于60 nm,本研究结果粒径稍大,提示在室内环境中打印机颗粒物发生变异的可能。分形维数D用于反映空气颗粒物的表面参数,一般介于1~3之间,该值越大,颗粒物表面越粗糙,扩散能力越低,毒物吸附作用相应也更强^[9-11];陈圆^[12]发现不同季节北京室外PM_{2.5}的分形维数D在1.04~1.79之间;王慧等^[13]发现室内建筑石灰尘、水泥尘和厨房烟尘的分形维数D分别介于2.22~2.29、2.19~2.24和2.26~2.34之间;本研究发现打印机所释放PM_{2.5}的分形维

数 D 达到了 2.591, 大于一般室内外颗粒物, 健康危害风险较大。

PM_{2.5} 的元素构成主要以 C 和 O 为主, 此外还含有 Si、Fe、Mg、Al 等元素, 这些元素主要来自碳粉添加剂, 用于防止碳粉结块和改善打印品质^[9]; 现有体内实验数据表明, 碳粉添加剂成分之一的二氧化钛可以导致大鼠肺脏发生氧化应激和纤维化, 而另一成分二氧化硅可以导致大鼠肺脏发生炎症和间质纤维增生^[14-15]。结合打印机释放颗粒物的纳米尺寸特性和较强的生物膜透过性, 推测兼具多器官损伤等健康风险^[16]。

研究结果显示, 当页面覆盖率较高时 PM₁ 的释放峰值较低, 这与本研究所使用的小型激光式打印机工作原理有关, 即硒鼓在感光后表面以正电荷显示打印图像, 碳粉在刮板和磁场作用下在磁辊上形成了一层碳粉雾, 当硒鼓和磁辊充分接近时, 碳粉被吸引至硒鼓上形成碳粉图像, 加压加热之后进入纸张纤维形成永久图像, 此过程中 PM₁ 释放主要来源于磁辊上未被硒鼓所吸附的碳粉雾, 所以页面覆盖率较高时硒鼓上所残留的碳粉雾较少, PM₁ 释放量也就越低。而其他研究所用墨盒式打印机工作原理为先在感光部件上形成打印图像, 之后吸引墨盒中的碳粉形成碳粉图像, 转印到纸张上并固定为永久图像, 为了保证感光部件的敏感性, 打印结束后需要将感光部件上的碳粉消除, 所以此过程中 PM₁ 释放主要来源于感光部件残留的碳粉颗粒以及固定过程中的颗粒物逸散, 故页面覆盖率较高时残留的碳粉颗粒较多, 其在固定过程中逸散较多, PM₁ 释放量也就越高^[17-18]。在进行连续打印工作时, 随着两次打印间静息时间的延长, PM₁ 释放峰值上升并与加热辊温度变化正相关, 主要原因是加热辊温度变化过大时, 部分碳粉未达到固定温度而以 PM₁ 的形式释放。连续打印工作中静息时间与 PM₁ 释放量的关系目前没有文献提及, 但在加热辊温度变化与 PM₁ 释放峰值的关系方面, 本研究的结论与 Sung 等^[18]一致。

综上, 打印店工作时会导致室内 PM_{2.5} 和 PM₁ 浓度上升, 且打印机 PM₁ 释放峰值受页面覆盖率和打印静息时间的影响。对海淀区 15 家打印店进行的职业环境状况调查结果显示, 打印店多设置于地下室, 半数打印店没有任何换气设备, 颗粒物平均扩散体积在 15 m³ 以下, 空气扩散状况不佳, 因此建议做好打印店室内环境质量监测, 加强从业者的健康

教育工作。打印机释放颗粒物成分比较复杂, 毒性效应尚不明确, 不宜使用一般颗粒物的空气质量标准进行评价, 需加强其毒理学研究以制定更为全面的评价标准。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参 考 文 献

- [1] Kreiss K. The epidemiology of building-related complaints and illness[J]. *Occup Med*, 1989, 4(4):575-592.
- [2] 冯仁杰, 吴然, 钟佩璐, 等. 孕期大气颗粒物暴露对新生儿低出生体重影响的 Meta 分析[J]. *中华预防医学杂志*, 2017, 51(3):203-208. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0253-9624.2017.03.003.
- [3] 石小飞, 陈瑞, 霍玲玲, 等. 打印机使用过程中颗粒物等有害因素释放及其毒理学效应研究进展[J]. *生态毒理学报*, 2014, 9(2):339-352. DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20131124001.
- [4] Karimi A, Eslamizad S, Mostafaei M, et al. Restrictive pattern of pulmonary symptoms among photocopy and printing workers: a retrospective cohort Study[J]. *J Res Health Sci*, 2016, 16(2):81-84.
- [5] 潘祥凯, 高衍新, 王德军, 等. 室内激光打印机污染物的释放特性[J]. *环境与职业医学*, 2017, 34(11):953-957. DOI: 10.13213/j.cnki.jeom.2017.17406.
- [6] Mandelbrot B. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension[J]. *Science*, 1967, 156(3775):636-638. DOI: 10.1126/science.156.3775.636.
- [7] 贾荷花, 李传统. 分形理论在颗粒物研究中的应用[J]. *南京师范大学学报(工程技术版)*, 2010, 10(2):39-44.
- [8] 中国建筑科学研究院. JGJ/T 309-2013 建筑通风效果测评与评价标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2014.
- [9] Pirela SV, Sotiriou GA, Bello D, et al. Consumer exposures to laser printer-emitted engineered nanoparticles: A case study of life-cycle implications from nano-enabled products[J]. *Nanotoxicology*, 2015, 9(6): 760-768. DOI: 10.3109 / 17435390.2014.976602.
- [10] 张季如, 朱瑞庚, 祝文化. 用粒径的数量分布表征的土壤分形特征[J]. *水利学报*, 2004, 35(4):67-71. DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2004.04.012.
- [11] Chou CK, Lee CT. On the aerodynamic behavior of fractal agglomerates[J]. *J Aerosol Sci*, 1997, 28(2):620-635.
- [12] 陈圆. 北京林业大学校区大气 PM₁₀、PM_{2.5} 的物理特性与分形分析[D]. 北京:林业大学, 2008.
- [13] 王慧, 刘喜禄, 程学珍. 基于分形理论和形状特征的大气颗粒物研究[J]. *环境科学与管理*, 2017, 42(4):56-59.
- [14] 赵小瑜. 不同粒径纳米二氧化钛气管暴露对大鼠氧化应激和 DNA 损伤作用的研究[D]. 唐山:河北医科大学, 2013.
- [15] 崔冠群. 气管滴注纳米二氧化硅对大鼠肺脏的影响[D]. 长春:吉林大学, 2014.
- [16] 熊丽林, 吴添舒, 唐萌. 大气纳米颗粒物对人体健康效应的研究进展[J]. *中华预防医学杂志*, 2015, 49(9):835-839.
- [17] He C, Morawska L, Taplin L. Particle emission characteristics of office printers[J]. *Environ Sci Technol*, 2007, 41(17): 6039-6045.
- [18] Sung G, Ha S, Kwon SB, et al. Reduction of Ultrafine Particles Emission from Office Laser Printers[J]. *J Aerosol Sci*, 2017, 103:15-23.

(收稿日期:2018-08-05)

(本文编辑:郑湃 张振伟)